

В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, Х. ДЖ. АБУДЖОХ, С. МАРКО, А. СЕНЬКО

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ С ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ПРИ ЕЁ МОДЕЛИРОВАНИИ

Исследуется проблема, возникающая при измерениях отдаваемой источником и потребляемой нагрузкой мощностей в системах с нелинейными элементами. Парадокс ситуации заключается в несбалансированности измеренных мощностей, что противоречит классической теории мощности. В качестве примера рассматривается простейшая электрическая система, в которой резистивная нагрузка питается через идеальный электрический вентиль от источника синусоидального напряжения. На виртуальной SimPowerSystem модели такой системы продемонстрировано, что измерения мощностей в источнике и нагрузке при помощи PQ-измерителей мощности приводит к ошибочным результатам. Такое неравенство мощностей обусловлено тем, что в основу PQ-измерителя положено измерение основных гармоник токов и напряжений, что является неприемлемым для систем с нелинейными элементами, так как такая оценка не учитывает наличие интервалов нулевого тока в системах с вентилями. Схожее несоответствие результатов дает и применение виртуальных измерителей, оценивающих мощность по действующим значениям тока и напряжения элемента. Для достижения точного замера мощностей разработан виртуальный измеритель мощности, основанный на использовании мгновенной мощности элемента. Именно мгновенная мощность учитывает отсутствие потребления мощности для случаев, когда присутствует лишь одна из величин, определяющих мощность, то есть либо при отсутствии напряжения, либо при нулевом токе. Ключевым элементом такого измерителя служит интегратор, который осуществляет интегрирование мгновенной мощности. Адекватность оценок мощности при использовании его в системе с вентилем продемонстрирована на визуальной модели. Проведено исследование влияния угла управления тиристором на амплитуду и угол, первой гармоники, сдвиг тока относительно питающего напряжения и мощности источника и на нагрузке. Установлено, что при изменении угла управления расхождений между потребляемой и отдаваемой мощностями не наблюдается.

Ключевые слова: электрическая система, идеальный вентиль, виртуальный измеритель мощности, действующее значение тока, мгновенная мощность, интервал нулевого тока

В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, Х. ДЖ. АБУДЖОХ, С. МАРКО, А. СЕНЬКО

ОБЧИСЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ В КОЛІ З ВЕНТИЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ПРИ ЙОГО МОДЕЛЮВАННІ

Досліджується проблема, що виникає при вимірах потужностей, що віддається джерелом і споживається навантаженням в системах з нелінійними елементами. Парадокс ситуації полягає в несбалансованості виміряних потужностей, що суперечить класичній теорії потужності. Як приклад розглядається найпростіша електрична система, в якій резистивне навантаження живиться через ідеальний електричний вентиль від джерела синусоїдальної напруги. На віртуальній SimPowerSystem моделі такої системи продемонстровано, що вимірювання потужностей в джерелі і навантаженні за допомогою PQ-вимірювачів потужності призводить до помилкових результатів. Така нерівність потужностей обумовлена тим, що в основу PQ-вимірювача покладений вимір основних гармонік струмів і напруг, що є неприйнятним для систем з нелінійними елементами, так як така оцінка не враховує наявність інтервалів нульового струму в системах з вентилями. Подібна розбіжність результатів дає і застосування віртуальних вимірників, що оцінюють потужність по діючим значенням струму і напруги елемента. Для досягнення точного виміру потужностей розроблений віртуальний вимірювач потужності, заснований на використанні миттєвої потужності елемента. Саме миттєва потужність враховує відсутність споживання потужності для випадків, коли присутня лише одна з величин, що визначає потужність, тобто або за відсутності напруги, або при нульовому струмі. Ключовим елементом такого вимірювача служить інтегратор, який здійснює інтегрування миттєвої потужності. Адекватність оцінок потужності при використанні його в системі з вентилем продемонстрована на візуальній моделі. Проведено дослідження впливу кута управління тиристором на амплітуду і кут, першої гармоніки, зрушення струму щодо напруги живлення і потужності джерела і на навантаженні. Встановлено, що при зміні кута управління розбіжностей між споживаною і віддаваною потужностями не спостерігається.

Ключові слова: електрична система, ідеальний вентиль, віртуальний вимірювач потужності, діюче значення струму, миттєва потужність, інтервал нульового струму

V. G. YAGUP, E. V. YAGUP, H. J. ABUJOH, S. MARCO, A. SENKO

CALCULATION OF POWER IN A CHAIN WITH A FAN ELEMENT IN ITS MODELING

The problem that arises in measurements given by the source and the consumed power load in systems with non-linear elements is investigated. The paradox of the situation lies in the imbalance of the measured powers, which contradicts the classical theory of power. As an example, we consider the simplest electrical system in which a resistive load is supplied through an ideal electric valve from a sinusoidal voltage source. On a virtual SimPowerSystem model of such a system, it was demonstrated that measuring power in the source and load using PQ power meters leads to erroneous results. This power inequality is due to the fact that the basis of the PQ meter is the measurement of the main harmonics of currents and voltages, which is unacceptable for systems with nonlinear elements, since this estimate does not take into account the presence of zero current intervals in systems with valves. A similar discrepancy in the results is also obtained by the use of virtual meters that evaluate power by the effective values of the current and voltage of the element. To achieve accurate power metering, a virtual power meter is developed, based on the use of the instantaneous power of the element. It is the instantaneous power that takes into account the absence of power consumption for cases when there is only one of the quantities that determine the power, that is, either in the absence of voltage or at zero current. The key element of such a meter is an integrator that integrates instantaneous power. The adequacy of power ratings when used in a valve system is demonstrated on a visual model. The effect of the thyristor control angle on the amplitude and angle, the first harmonic, the current shift relatively to the supply voltage and power of the source, and on the load are studied. It is established that when the control angle is changed, no discrepancy between the consumed and given power is observed.

Keywords: electrical system, ideal valve, virtual power meter, effective current value, instantaneous power, zero current interval

Введение. Одним из ключевых вопросов в электроэнергетике является правильная оценка количества потребляемой электроэнергии и контроля качества электроэнергии в электроснабжающих системах [1, 2]. Современные концепции компенсации реактивной мощности также основаны на определении составляющих полной мощности [3], а снижение реактивной мощности в электрической сети означает уменьшение потерь и повышение коэффициента полезного действия. Особого подхода требуют оценки мощности в случаях питания нагрузки через нелинейные элементы.

Анализ состояния проблемы. При анализе научной литературы [4-6] в области представлений понятий о мощности в электрической системе и различных её составляющих наблюдается противоречивость. Особый интерес вызывают трактовки составляющих мощности применительно [7, 8]. В таких системах токи и напряжения подвержены искажениям синусоидальной формы. Таким образом, теория мощности переменного тока, известная по классическим учебникам теоретической электротехники, в непосредственном формальном её применении нарушается. Например, в [9] определяются энергетические соотношения в системе, в которой рассматривается питание нагрузки, представленной резистором с единичным сопротивлением, через идеальный неуправляемый клапан от источника синусоидального напряжения с единичной амплитудой. Наблюдаемый и описанный в статье [9] парадокс заключается в неравенстве мощностей, потребляемой нагрузкой и отдаваемой источником электрической энергии, что противоречит общеизвестному закону баланса мощностей [5, 6].

Цель статьи состоит в исследовании на визуальной модели электрической системы с неуправляемым и управляемым идеальными электрическими клапанами для определения отдаваемой источником мощности и потребляемой нагрузкой мощности при различных способах построения виртуальных измерителей мощности.

Метод решения проблемы. На рис. 1 представлена виртуальная модель исследуемой системы со стандартными виртуальными измерителями мощности самой системы SPS.

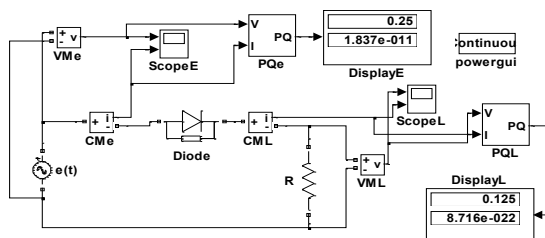


Рисунок 1 – Модель системы с виртуальными PQ-измерителями мощности SPS

В модели источник напряжения $e(t)$ генерирует синусоидальное напряжение с амплитудой 1 В и частотой 0,5 Гц. Параметры виртуального диода Diode заданы таким образом, чтобы клапан можно было

полагать близким к идеальному. Мощность, рассеиваемая на таком клапане близка к нулю, что позволяет рассматривать баланс мощностей лишь в отношении источника и нагрузки. Нагрузка представлена активным сопротивлением резистора R с сопротивлением 1 Ом. Соответствующие временные диаграммы напряжений и токов по результатам моделирования (рис. 2) демонстрируют адекватность модели.

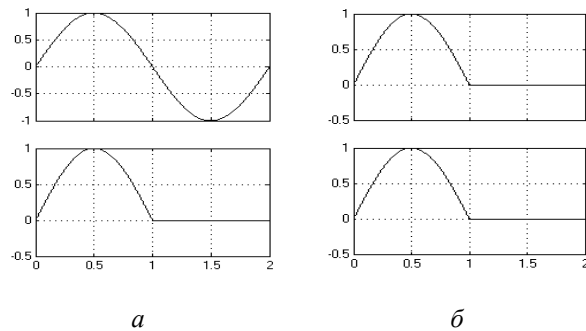


Рисунок 2 – Временные диаграммы напряжения и тока: а – источника; б – нагрузки

Активная мощность источника равна $S=0,25$ Вт, а потребляемая нагрузкой активная мощность – $P=0,125$ Вт. Таким образом, проявляется явление парадокса [9], состоящего в неравенстве мощностей, потребляемой нагрузкой и отдаваемой источником. Следует отметить, что значения мощностей источника и нагрузки отличаются от указанных в [9], где они составляют величины, равные 0,3536 и 0,25 Вт соответственно и дают отношение 1,4. В случае моделирования это отношение равно 2,0. Проанализируем структуру виртуального измерителя мощности системы SPS (рис. 3).

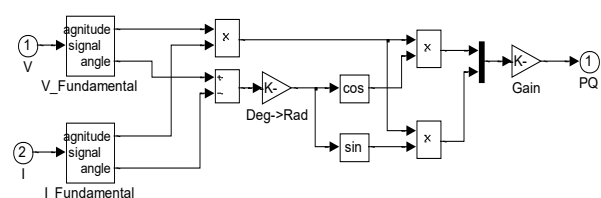


Рисунок 3 – Виртуальный измеритель мощности системы SPS

Здесь напряжение и ток, обуславливающие измеряемую мощность, поступают на блоки V_Fundamental и I_Fundamental, которые представляют собой анализаторы гармонических составляющих заданного порядка. Структура модели первого виртуального прибора показана на рис.4.

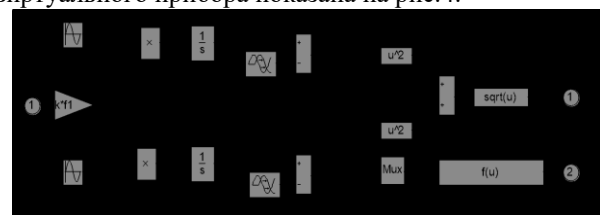


Рисунок 4 – Виртуальный анализатор гармоник системы SPS (V-Fundamental)

В результате анализа блоков, из которых состоит стандартный виртуальный измеритель PQ-мощностей системы SPS можно прийти к выводу, что он фактически измеряет мощности, обусловленные основными гармониками напряжения и тока. На источнике напряжения учитываются полное напряжение источника в течение периода с единичной амплитудой и основная гармоника тока с амплитудой 0,5 А. Следовательно стандартный виртуальный измеритель PQ-мощностей обеспечивает адекватные показания лишь при синусоидальных напряжениях и токах, создающих мощность на переменном токе.

Из математических выкладок [9] мощности вычисляются путём умножения действующего значения напряжения на действующее значение тока. Таким образом, для вычисления мощности фактически используется формула:

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (1)$$

Модель исследуемой системы, в которой реализованы измерения мощностей источника и нагрузки по действующим значениям напряжения и тока, приведена на рис. 5.

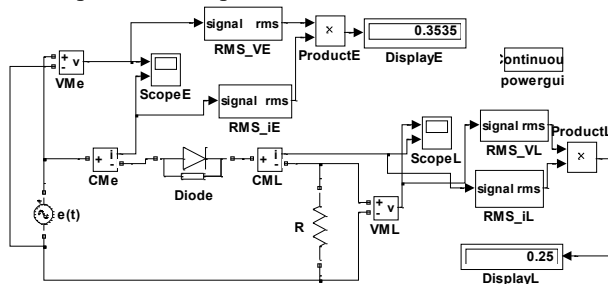


Рисунок 5 – Модель системы с виртуальными измерителями мощности по действующим значениям напряжения и тока

Здесь для вычисления действующих значений напряжений и токов использован виртуальный прибор RMS системы SPS. Структура этого прибора изображена на рис. 6.

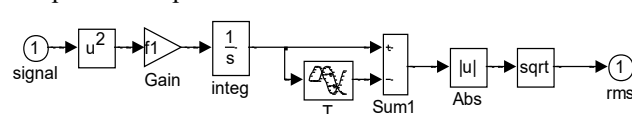


Рисунок 6 – Виртуальный вычислитель действующего значения системы SPS

В таком варианте результаты моделирования показывают именно те значения мощностей, которые получены в [9].

Следует учесть, что во втором полупериоде как в нагрузке, так и в источнике работа не совершается. В нагрузке это представляется более наглядно, потому что во втором полупериоде и напряжение на нагрузке и её ток равны нулю. Это обстоятельство сказывается на вычислениях как амплитуд основных гармоник напряжения и тока по первой модели (рис. 1), так и действующих значений напряжения и тока по второй модели (рис. 5). При вычислениях мощности источника

напряжение в обоих рассмотренных случаях оказывается учтённым в двух полупериодах. Однако во втором полупериоде отдаваемая источником мощность отсутствует, поскольку отсутствует ток, потребляемый от источника.

Для адекватных вычислений активной мощности для случая периодических несинусоидальных напряжений и токов исследуемого элемента предложим разделить период T на n интервалов длительностью $\Delta t = T/n$, полагая, что в течение каждого k -го интервала напряжение и ток имеющими постоянные усредненные на интервале значения u_k и i_k . Тогда работа A_k , совершаемая электрическим током на k -м интервале определится выражением $A_k = \Delta t u_k i_k$.

Просуммировав все элементарные работы на периоде и усреднив полученной значение полной работы на интервале периода, найдем активную мощность

$$P = \frac{1}{T} \left(\sum_{k=1}^n u_k i_k \Delta t \right). \quad (2)$$

Замена суммы интегралом при неограниченном увеличении числа интервалов n приводит это выражение к интегральному виду:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (3)$$

Последнее выражение представляет собой известное выражение активной мощности через мгновенную мощность, представляющую собой произведение мгновенных величин напряжения и тока исследуемого элемента [10].

Исходя из приведенных соображений, можно создать виртуальный измеритель активной мощности на основе интегрирования мгновенной мощности. Такой измеритель представлен на рис. 7.

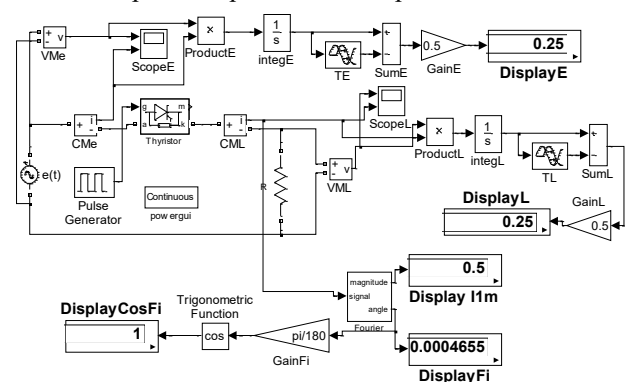


Рисунок 7 – Модель системы с виртуальными измерителями мощности на основе мгновенных мощностей

Виртуальные измерители мощности собраны здесь на основе использования понятия мгновенной мощности. В модели на рис. 7 диод заменён тиристором, управляемым от источника импульсов Pulse Generator. Это позволяет повторить анализ системы при изменении угла управления тиристором. В изображённом на рис. 7 случае установлен нулевой угол управления, что

фактически превращает тиристор в диод. Таким образом, последняя модель эквивалентна по поведению силовой части ранее рассмотренным двум моделям (рис. 1 и рис. 5). Как видно из представленной на рис. 7 модели, показания виртуальных приборов при определении мощности по (3) совершенно одинаковы и совершенно не парадоксальны. Обе мощности составляют величины 0,25 Вт.

Исследование системы с управляемым тиристором в данном случае также не приводит к парадоксу неравенства отдаваемой и потребляемой мощностей. Результаты изменения угла управления в пределах значений, приведённых в [9], отображены в таблице.

Таблица 1 – Результаты моделирования системы с тиристором

Угол управления α	0	30	60	90	120	150
I_{m1}	0,5	0,487	0,420	0,296	0,154	0,042
Угол 1-й гармоники φ	0	-4,68	-16,5	-32,5	-50,7	-70,1
$\cos \varphi$	1	0,997	0,959	0,844	0,634	0,341
Мощность источника S	0,25	0,243	0,201	0,125	0,049	0,0072
Мощность на нагрузке P	0,25	0,243	0,201	0,125	0,049	0,0072
Отношение	1	1	1	1	1	1

Результаты моделирования системы с тиристором при изменении угла управления свидетельствуют о том, что при использовании мгновенной мощности для оценки генерируемой и потребляемой мощностей расхождений между их значениями не наблюдается. Увеличение отношения мощностей S/P при увеличении угла управления, отмеченное в [9], происходит потому, что при этом увеличивается интервал нулевого тока в нагрузке и в источнике. В нагрузке это обстоятельство правильно учитывается, поскольку здесь интервал нулевого тока и напряжения совпадают. В источнике же напряжение на всём периоде полагается ненулевым, и при раздельном учете напряжения и тока по выражению (1) это приводит к неправильным результатам. Эти ошибочные результаты и содержатся в строке S таблицы работы [9], отображающей активную мощность источника.

Выводы. При моделировании электрических систем, содержащих нелинейные элементы в виде неуправляемых и управляемых электрических вентилях, необходимо критически подходить к возможностям оценки мощностей в системе при помощи стандартных виртуальных измерителей РО-мощностей. Неадекватность показаний этих виртуальных приборов обусловлена тем обстоятельством, что их показания основаны на выделении основных гармоник тока и напряжения исследуемого элемента. Такая оценка не учитывает наличие интервалов нулевого тока в системах с вентилями.

Аналогичные неадекватные результаты дают виртуальные измерители, в которых мощность

определяется произведением действующих значений напряжения и тока исследуемого элемента.

Использование мгновенной мощности, определяемой произведением напряжения элемента на его ток, с последующим интегрированием и усреднением, позволило создать виртуальный измеритель активной мощности для использования его при моделировании системы с вентилем.

Список литературы

1. Сокол Е.И. Качество электрической энергии. / Е.И.Сокол, Д.А.Гапон, О.Г.Гриб и др. – Т.2. Контроль качества электрической энергии. – Х.: Тим Паблш Груп, 2014. – 244 с.
2. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю. А. Сиротин // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. Сб. тр. VI МНТК, EPQ-2008. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ. – 2008. – С. 211–214.
3. Зорин В.В. Концепция компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях / В.В. Зорин // Промелектро. – 2005. – №3. – С. 24 – 26.
4. Czarnecki L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned/ L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Instr. Meas. – 1987. – IM-36. – no.3. – pp.834–837.
5. Крögerис А.Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крögerис, К.К.Рашенин, С.И.Трейманис – Рига: Физ.-энерг. Ин-т Латв.АН, 1993. – 294 с..
6. Тонкаль В.Е. Баланс энергии в электрических цепях / [В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др.] – Киев: Наукова думка. – 1992. – 312 с.
7. Маевский О.А. Энергетические показатели вентилях преобразователей / О.А. Маевский – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
8. Чаплыгин Е. Е. Теория мощности в силовой электронике/ Е. Е. Чаплыгин, Н. Г. Калугин. Учеб. пособие по специальности "Промышленная электроника". – М.: МЭИ (ТУ), 2006. – 56 с – Режим доступа: promel2000.narod.ru/posobia/tm.doc
9. Долбая В.Т. Об одном парадоксе, возникающем при анализе цепей с выпрямителями (в порядке обсуждения) // Наукотехнический журнал "Электроинформ", "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория і практика". – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 448–451.
10. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379
11. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References (transliterated)

1. Sokol Ye.I. Kachestvo elektricheskoy energii. / Ye.I.Sokol, D.A.Gapon, O.G.Grib i dr. – T.2. Kontrol' kachestva elektricheskoy energii. – KH.: Tim Pabliш Grup, 2014. – 244 p.
2. Sirotin YU. A. Uravneniye moshchnosti i shtrafnyye sanktsii za asimmetrichnyuyu nagruzku / YU. A. Sirotin // Effektivnost' i kachestvo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Сb. tr. VI MNTK, EPQ-2008. – Mariupol': Izd-vo PGТУ. – 2008. – P. 211–214.
3. Zorin V.V. Kontseptsiya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh / V.V. Zorin // Promelektro. – 2005. – №3. – P. 24 – 26.
4. Czarnecki L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned/ L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Instr. Meas. – 1987. – IM-36. – no.3. – PP.834–837.
5. Krogeris A.F. Moshchnost' peremennogo toka / A. F. Krogeris, K.K.Rashenin, E.I.Treymanis – Riga: Fiz.-energ. In-t Latv.AN, 1993. – 294 p.
6. Tonkal' V.Ye. Balans energii v elektricheskikh tsepyakh / [V.Ye. Tonkal', A.V. Novosel'tsev, S.P. Denisuk i dr.] – Kiyev: Naukova dumka. – 1992. – 312 p.
7. Mayevskiy O.A. Energeticheskiye pokazateli ventil'nykh preobrazovateley / O.A. Mayevskiy – M.: Energiya, 1978. – 320 p.
8. Chaplygin Ye. Ye. Teoriya moshchnosti v silovoy elektronike/ Ye. Ye. Chaplygin, N. G. Kalugin. Ucheb. posobiye po spetsial'nosti "Promyshlennaya elektronika". – M.: MEI (TU), 2006. – 56 p – Rezhim dostupa: promel2000.narod.ru/posobia/tm.doc

9. Dolbnya V.T. Ob odnom paradokse, vznikayushchem pri analize tsepey s vypryamitelyami (v poryadke obsuzhdeniya) // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Yelektroinform", "Problemi avtomatizovanogo yelektroprivoda. Teoriya i praktika". – L'viv: YEKOfinform, 2009. – P. 448–451.

10. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379 p.

11. Chernykh I.V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. / I.V. Chernykh – M.: DMK Press, SPb.: Piter, 2008. – 288 p.

Поступила (received) 01.08.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хейдар Джафар Абуджох (Хейдар Джафар Абуджох, Heidar Jafar Abujo) – помічник менеджера, управління електроенергії та води Дубая, відділ обслуговування зв'язку. Дубай, Об'єднані Арабські Емірати; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9860-8927>; e-mail: haidarjokh2004@yahoo.com

Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерій Григорьевич, Yagup Valery Grigorievich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>; e-mail: yagup.valery@gmail.com

Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Ekaterina Valerievna) – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: kata3140@gmail.com